УДК 004.93

Є.М. Федорченко, А.О. Олійник, С.К. Корнієнко, А.С. Харченко
Національний університет «Запорізька політехніка», Україна
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063

РОЗРОБКА Й ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕТИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ РОЗТАШУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

I. Fedorchenko, A. Oliinyk, S. Korniienko, A. Kharchenko
National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Ukraine
64, Zhukovskoho St., Zaporizhzhya, 69063

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A GENETIC METHOD FOR THE ANALYSIS AND DETERMINATION OF THE LOCATION OF POWER GRID OBJECTS

Розглянуто проблему комбінаторної оптимізації щодо вибору локації розміщення джерел живлення при вирішенні задачі розвитку міських розподільних мереж електропостачання. Розроблено два методи розміщення джерел живлення та закріплення за ними споживачів для вирішення цієї проблеми. Перший розроблений метод полягає в розміщенні джерел живлення однакових типорозмірів, а другий – різних типорозмірів. Принципова відмінність створених методів від існуючих полягає в тому, що запропоновані методи враховують увесь матеріал завдання та мають спеціалізовані способи кодування можливих рішень, модифікованих операторів схрещування й селекції. Запропоновані методи ефективно вирішують проблему низького успадкування, топологічної нездійсненності знайдених рішень, у результаті чого значно скоротився час виконання та підвищилася точність розрахунків. У розроблюваних методах реалізована відсутність обліку обмежень на розміщення нових джерел живлення, яка дозволила вирішити проблему застосування методів для вузького кола завдань. Було проведено порівняльний аналіз отриманих результатів методом розміщення джерел живлення однакових типорозмірів та відомих методів, і встановлено, що розроблений метод працює швидше, ніж відомі методи. Показано, що пропонований підхід забезпечує стійку збіжність процесу пошуку за прийнятну кількість кроків без штучного обмеження простору пошуку та використання додаткової експертної інформації про доцільність можливих рішень. Отримані результати дозволяють запропонувати ефективні методи для підвищення якості прийнятих рішень по вибору місця розташування об'єктів електропостачання при проєктуванні міських електричних мереж.

Ключові слова: генетичний алгоритм, джерело живлення, еволюційний алгоритм, система електропостачання, комбінаторний аналіз

The problem of combinatorial optimization is considered in relation to the choice of the location of the location of power supplies when solving the problem of the development of urban distribution networks of power supply. Two methods have been developed for placing power supplies and assigning consumers to them to solve this problem. The first developed method consists in placing power supplies of the same standard sizes, and the second - of different standard sizes. The fundamental difference between the created methods and the existing ones is that the proposed methods take into account all the material of the problem and have specialized methods for coding possible solutions, modified operators of crossing and selection. The proposed methods effectively solve the problem of low inheritance, topological unfeasibility of the found solutions, as a result of which the execution time is significantly reduced and the accuracy of calculations is increased. In the developed methods, the lack of taking into account the restrictions on the placement of new power supplies is realized, which made it possible to solve the problem of applying the methods for a narrow range of problems. A comparative analysis of the results obtained by placing power supplies of the same standard sizes and known methods was carried out, and it was found that the developed method works faster than the known methods. It is shown that the proposed approach ensures stable convergence of the search process by an acceptable number of steps without artificial limitation of the search space and the use of additional expert information on the feasibility of possible solutions. The results obtained allow us to propose effective methods to improve the quality of decisions made on the choice of the location of power supply facilities in the design of urban electrical.

Keywords: genetic algorithm, power supply, evolutionary algorithm, power supply system, combinatorial analysis

Вступ

Останнім часом збільшився попит на електроенергію, внаслідок чого проєктувальники систем електропостачання міст мають справу з великою кількістю вхідної інформації [1]. Обробка та аналіз великих масивів інформації й висока динаміка їх параметрів призвели до необ-

хідності розробки нових методів розміщення об'єктів електропостачання [2].

Ефективність функціонування систем виробництва, передачі і розподілу електричної енергії багато в чому визначається конструкторськими рішеннями, які були використані в процесі формування електричних мереж і систем. У загальному випадку, завдання проєктування розвитку електроенергетичних систем і електричних мереж полягає в розробці та економічному обґрунтуванні технічних рішень, що забезпечують надійне і якісне енергопостачання споживачів електричної енергії з урахуванням усіх технічних, технологічних, екологічних, соціальних та інших обмежень [2].

При проєктуванні міських електричних мереж виникає завдання вибору раціональної конфігурації системи електропостачання. Під конфігурацією системи електропостачання розуміють певне взаємне розташування елементів системи електропостачання (кабельних, повітряних ліній, трансформаторних та силових підстанцій і т. п.), взаємозв’язок елементів у системі електропостачання, з’єднання елементів у форми певної структури [2].

Електропостачання всіх об’єктів, з одного боку, має бути достатнім по потужності й задовольняти вимогам надійності живлення споживачів різних категорій, а з іншого – економічно, доцільно організовано.

Завдання вибору місця фактичного розміщення об’єктів електропостачання є завданням з сотнями альтернативних рішень, і планувальники повинні знайти рішення, яке найбільше підходить. У зв’язку зі складністю поставленого завдання з вибору раціональної конфігурації електромережі, ще не знайшло свого детального розгляду й вирішення завдання розміщення декількох джерел живлення різних та однакових типорозмірів і одночасного закріплення споживачів за цими джерелами живлення. Тому завдання розміщення об’єктів електропостачання на стадії проєктування є актуальним [3].

Існуючі моделі та алгоритми для вирішення завдання оптимального розміщення використовують апарат дискретного програмування, за допомогою якого завдання вирішується повним або частковим перебором [3], що уповільнює процес знаходження оптимального результату. Альтернативою даному підходу є використання евристичних алгоритмів, які характеризуються високою ефективністю й забезпечують виявлення оптимального рішення в усьому просторі пошуку за прийнятне число кроків. У даній статті пропонується модифікований генетичний алгоритм рішення дискретної задачі про розміщення об’єктів електропостачання та одночасне закріплення за ними споживачів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У запропонованій роботі розглядається та досліджується завдання першого етапу створення раціональної конфігурації електро-мережі, а саме – вирішується завдання розміщення декількох ДЖ у розподільній електричній мережі й одночасного закріплення споживачів за обраними ДЖ. Розв’язуване завдання відноситься до завдань комбінаторного пошуку, де вирішується оптимізаційне завдання. Суть завдання полягає в переборі всіх можливих варіантів розміщення ДЖ та закріплення за ними споживачів, потім їх оцінці та вибору найкращого варіанту [4].

Усі методи комбінаторної оптимізації можна умовно розділити на: точні й евристичні. До точних методів належать: метод повного перебору, метод неявного перебору, метод гілок і меж та ін. Одними з різновидів евристичних алгоритмів є популярні останнім часом генетичні алгоритми (ГА) та штучні нейронні мережі (ШНМ). Отже, розглянемо методи вирішення завдання для побудови раціональної конфігурації систем електропостачання [4].

У роботі [5] наведено опис методу визначення числа й місць розташування нових трансформаторних і розподільних підстанцій, будівництво яких необхідно для забезпечення всіх нових споживачів

можливістю підключення до мережі енергопостачання. Запропонований метод авторами ґрунтується на методі k-середніх. Основна ідея полягає в тому, що спочатку з множини можливих місць будівництва нових трансформаторних і розподільних підстанцій випадковим чином вибираються N-точки, які будуть центрами кластерів (центроїдами). Потім відбувається перерозподіл споживачів за кластерами за принципом найменшого видалення від центру кластера. Іншими словами, споживач відноситься до того кластера, відстань до центроїда якого для цього споживача є найменшою, ніж до будь-яких інших. Далі для кожного з отриманих кластерів розраховується його навантажувальний центр ваги й з множини можливих місць будівництва нових підстанцій вибирається точка, яка найближче розташована до нього. Зазначена точка приймається за новий центроїд, потім відбувається перерозподіл споживачів за описаним вище принципом. Процес кластеризації завершується тоді, коли на черговому кроці роботи алгоритму координати жодного з центрів кластерів не зміняться.

Перевага запропонованого авторами методу є простою, а обчислювальні витрати - низькими.

Недоліком даного методу є необхідність попереднього визначення числа кластерів, а також залежність результату рішення від обраних спочатку центрів кластерів.

У роботі [6] запропоновано метод вибору розміщення нових трансформаторних підстанцій за допомогою роздільної кластеризації. Спочатку всі споживачі об'єднуються в один кластер і проводиться перевірка можливості будівництва трансформаторної підстанцій у деякій точці з допустимої множини. Перевірка відбувається таким чином, щоб були виконані умови можливості підключення для всіх споживачів у кластері. Якщо ця умова виконана, алгоритм припиняє роботу, і вибрана точка визначається місцем будівництва нової трансформаторної підстанції. У разі, коли зазначена вище умова не виконується, то вихідний кластер ділиться на два кластери за таким правилом: визначається пара споживачів з множини, відстань між якими більша, ніж між будь-якими іншими споживачами цієї множини. Кожен з обраних споживачів утворює кластер і є його центроїдом. Ці споживачі виключаються з подальшого розгляду. Потім знову визначається одна пара споживачів, відстань між якими більша, ніж між будь-якими іншими споживачами. Ці споживачі розподіляються за попередньо утвореними кластерами: першим до кластера відноситься об'єкт, який найближче розташований до одного з центроїдів, а другий споживач відноситься до іншого кластера. Дана процедура виконується послідовно доти, поки з розгляду не будуть вилучені всі споживачі. Якщо споживачів непарне число, то останній споживач відноситься до кластера, до центроїда якого він розташований ближче. Метод продовжує роботу до тих пір, поки для всіх виділених кластерів не буде виконано умову можливості будівництва нової ТП і підключення до неї всіх споживачів.

Запропонований на основі роздільної кластеризації метод відноситься до ієрархічних кластеризаційних методів, перевагою якого, порівняно з методом k-середніх, є відсутність необхідності задання числа кластерів.

Недоліком методу є високі обчислювальні витрати й, отже, можливість його застосування тільки для кластеризації невеликого числа об'єктів.

У роботі [7] визначення місця розташування джерела живлення засноване на законах класичної механіки (визначення центру ваги). Є ряд математичних методів, що дозволяють аналітичним шляхом визначати умовний центр електричних навантажень (ЦЕН). Центр електричних навантажень – це геометрична точка, розміщення якої характеризує розподіл навантажень (мас у тілі або механічній системі). Завдання вирішується в припущенні, що навантаження якого-небудь

об’єкта (споживача) рівномірно розподілене по його площі. Навантаження в цьому випадку представляють у вигляді кіл з радіусами, пропорційними величинам навантажень (споживаної потужності).

Описаний метод відшукання ЦЕН відрізняється простотою й наочністю, похибка розрахунків за цим методом не перевищує 5–10%. При такому підході передбачається, що витрати пропорційні не відстаням, а квадратам відстаней від джерела живлення до споживача. Це припущення якраз і визначає помилку методу, але одночасно дає досить прості формули для визначення ЦЕН [3].

Крім цього, в публікації [3] передбачається, що ЦЕН – це не деяка постійна точка й, що вона має тенденцію з плином часу зміщуватися через зміни споживаної потужності окремими приймачами, через зміну соціально-економічних і екологічних умов і т.д. Тому правильніше говорити не про центр як деяку стабільну точку, а про зону розсіювання центру електричних навантажень. Очевидно, що значення запропонованого методу полягає в мінімізації сумарної відстані між ТП і споживачами з урахуванням величини потужності кожного споживача. При цьому не враховуються реальні умови проходження ЛЕП і обмеження, що існують на території для розміщення ТП.

У роботі [8] описується метод розміщення ТП та РП**,** заснований на виборі одного з декількох можливих варіантів в умовах багатокритеріальності за допомогою методу повного перебору. У цьому випадку задається декілька можливих місць розташування ТП та РП і приблизні маршрути проходження ЛЕП для кожного варіанта й потім вибирається з цих варіантів найкращий.

Запропонований авторами алгоритм є простим та легким для реалізації й гарантує, що буде знайдений найкращий варіант розміщення ТП та РП, але для цього може знадобитися неприйнятно довгий час. Логічно зробити висновок, що повний перебір планів є дуже небажаним способом вирішення комбінаторних завдань, свого роду крайнім засобом, за відсутності більш практичних алгоритмів. Слід використовувати будь-яку можливість, що дозволяє або істотно скоротити перебір з урахуванням специфіки конкретної задачі, або взагалі, коли таке можливо, відмовитися від перебору й використовувати інші підходи до вирішення поставленого завдання та інші методи рішення.

У роботі [9] представлена розробка методу оптимального розміщення РП для задач малої розмірності з урахуванням втрат напруги від центральної підстанції (ЦП) до віддалених споживачів. Як технології оптимізації, авторами був обраний мурашиний алгоритм. Розроблений метод заснований на поведінці мурах при пошукові найкоротших шляхів до їжі, за їжу в цій роботі виступає РП. Якщо мураха в процесі пошуку знаходить їжу, то, повертаючись в мурашник, залишає на зворотному шляху сліди свого феромону. У результаті вдалого пошуку їжі декількома мурахами будуть сформовані стежки, концентрація феромонів на яких більша, ніж в іншому просторі пошуку. З великою часткою ймовірності інші мурашки підуть саме за такою стежкою. У результаті буде сформований найкоротший, оптимальний шлях до джерела їжі. У контексті даного рішення, місця з найбільшою концентрацією феромонів є наборами змінних з найкращими рішеннями завдання. Перевагою цього методу є вища швидкість знаходження оптимального рішення, ніж у традиційних методів, що характеризується масштабованістю і гнучкістю при збільшенні розмірності. Однак запропонований метод має складний код і велику кількість настроюваних параметрів.

У роботі [10] представлено рішення задачі планування системи енергопостачання, а саме – визначення оптимального розміру й розташування ТП при одночасному задоволенні вимог споживачів з мінімальним оновленням системи. Розроблений алгоритм заснований на імітації відпалу. Для отримання оптимального рі-

шення використовується упорядкований, випадковий пошук на основі реального фізичного процесу, який відбувається при відпалі металів. Метод відпалу ґрунтується на природному процесі переходу речовини з рідкого стану у твердий, у результаті його нагрівання й повільного охолодження формується оптимальна структура. Критерій охолодження є основною точкою методу оптимізації імітації відпалу. Фактично, даний метод залежить від трьох змінних: початкової температури, швидкості охолодження й кінцевої температури. Процес ініціюється з точки можливого розміщення джерел живлення. Після оновлення системи електропостачання будуть визначені нові можливі рішення на основі ймовірнісного критерію прийнятності.

Запропонований алгоритм має досить просту реалізацію, при цьому величезною перевагою є властивість уникнення «пастки» в локальних мінімумах функції, що оптимізується, й можливість продовження пошуку глобального мінімуму.

До недоліків можна віднести необхідність багатократних тестів для правильного вибору параметрів алгоритму. Результат роботи даного алгоритму дуже залежить від обраних значень параметрів, що є неприйнятним для вирішення поставленого завдання.

У публікації [11] для розширення розподільчої мережі використовується гібридний метод гілок і меж. Авторами вирішується завдання оптимізації розміщення ТП, а також проєктування мереж середньої напруги з обґрунтуванням маршрутів передачі електроенергії від джерел живлення до споживачів. У цьому випадку для вирішення комбінаторного завдання оптимізації застосовується метод гілок і меж. Даний метод є модифікацією алгоритму повного перебору, що гарантує точність результату його роботи. Суть методу полягає в побудові дерева повного перебору й відсіканні безперспективних гілок рішення, у міру його обходу, що істотно зменшує час його роботи. Метод гілок і меж скорочує час пошуку оптимального рішення за рахунок того, що при входженні в кожен вузол виконується верхня й / або нижня оцінка можливого рішення, до якого призведе обхід піддерева, коренем якого є поточний вузол. Відповідно до отриманої оцінки, робиться висновок: якщо найкраще з можливих рішень гірше поточного, то дане піддерево (гілка) відсікається й обхід триває з наступного вузла того ж рівня, на якому було вироблено відсікання.

Перевагою даного методу є те, що він дозволяє отримати рішення у вигляді глобального екстремуму при зменшенні числа кроків методу гілок і меж.

Головний недолік запропонованого авторами методу полягає в необхідності повністю вирішувати завдання лінійного програмування. Для задач великої розмірності це вимагає значних і, до певної міри, невиправданих з практичної точки зору витрат часу.

У публікації [12] для вирішення задачі про розміщення ДЖ запропонована наступна методика: пропонується розбити трасу прокладки лінії електропередачі на зони, які мають різні вартісні показники. На межах зон вказані точки переходу з однієї зони в іншу. Потрібно побудувати оптимальну трасу лінії електропередачі, що зв'язує початкову й кінцеву точку. У запропонованій роботі пропонується вирішувати цю задачу методом динамічного програмування, в якому для відшукання оптимального рішення запланована операція розбивається на ряд кроків (етапів) і планування здійснюється послідовно, від етапу до етапу, причому вибір методу рішення на кожному етапі проводиться з урахуванням інтересів операції в цілому. Як технології оптимізації, авторами був обраний алгоритм гравітаційного пошуку, котрий ґрунтується на концепції всесвітнього тяжіння. Відповідно до цієї концепції, тіла з найбільшою масою мають найбільшу силу тяжіння інших тіл у просторі. Згодом усі частинки в просторі притягуються до найбільших центрів мас. Щодо

оптимізаційного алгоритму частинок – це режими з наборами змінних. У процесі виконання завдання, найбільш вдалі рішення притягують до себе найближчі, тим самим збільшуючи свою вагу серед усіх можливих варіантів.

Перевагою запропонованого авторами методу є його простота та легкість впровадження даної задачі, а також він має високий ступінь випадковості генерації змінних, що забезпечує охоплення всього простору пошуку. Недоліком цього методу є погана здатність локального пошуку рішення й необхідність у тонкій настройці початкових параметрів методу.

У публікації [13] розглядається завдання вибору оптимальної потужності й оптимального розміщення джерел живлення (підстанцій) у розподільних електричних мережах. У роботі для вибору оптимального місця розташування підстанції використовується табу-пошук. Запропонований метод заснований на механізмі спуску, котрий рухається до оптимального рішення. Алгоритм має список заборон, які містять у собі деяку кількість рішень, знайдених на попередніх ітераціях. За рахунок цього алгоритм не зациклюється на знаходженні повторюваних рішень. Для виходу з локального оптимуму передбачений механізм погіршення результатів.

Перевагою запропонованого авторами методу є те, що він дозволяє скоротити час на обробку первинних даних і має прийнятний час виконання завдання. Недоліком методу є те, що він має велику кількість параметрів, що настроюються й низький коефіцієнт точності.

У публікації [14] представлена наступна задача: існує діюча розподільна мережа, з плином часу на території району додаються нові вузли навантаження, вказані місця розміщення нових вузлів та можливі місця розміщення підстанцій. Слід провести процедуру переконфігурації мережі так, щоб знову сконструйована розподільна мережа була оптимальною в сенсі витрат. Для цього в роботі запропонований модифікований генетичний алгоритм. Основна ідея пропонованого підходу полягає в поданні характеристик і властивостей можливих рішень за допомогою двійкового коду та формуванні вектора, що містить бінарні ланцюжки властивостей варіанта вирішення. Очевидно, що такий вектор певною мірою відповідає спрощеній математичній моделі генотипу біологічного організму, що містить повну інформацію про цей організм. Вказана обставина дозволяє застосувати основні генетичні операції схрещування, що призводять до формування нових рішень з новими властивостями. Формування можливих рішень здійснюють циклічно на підставі попередніх поколінь з використанням генетичних операцій кросинговеру (схрещування), інверсії й мутації, які застосовуються випадковим чином за стохастичними законами. При цьому пріоритет при схрещуванні мають рішення, що характеризуються найбільшими значеннями оціночної функції ефективності, що гарантує поступове поліпшення якості пропонованих рішень.

Перевагою даного методу є те, що він має простоту й прозорість реалізації кодування й декодування інформації, а також знижену ймовірність зациклення процесу пошуку в локальних оптимумах.

Недолік полягає в тому, що він має високу ітеративність алгоритму, істотну залежність ефективності пошуку від обраних параметрів, а також високу ймовірність передчасної збіжності циклічного пошуку.

У роботі [15] була запропонована штучна нейронна мережа (ШНМ) для вирішення завдання вибору оптимальної конфігурації розподільної електричної мережі. Як цільова, запропонована функція, що враховує капітальні витрати на будівництво та щорічні витрати на експлуатацію такої мережі. Використання ШНМ широко відомо й добре підходить для вирішення поставленого завдання. ШНМ є спрямованим, зваженим графом, вершини якого моделюють функціонування біологічних нейронів. Вершини приймають

вхідні сигнали й при досить великому значенні їх зваженої суми перетворюють їх у вихідний сигнал. Навчання ШНМ виконується на основі емпіричних даних та полягає в обчисленні коефіцієнтів зв'язків між вершинами, що визначають силу сигналів, які входять. У роботі для вирішення завдання була розроблена нейронна мережа зі зворотним поширенням помилки. Нейронна мережа містить 7 нейронів, функція навчання здійснюється за допомогою алгоритму Levenberg-Marquardt backpropagation.

Перевагою даного методу є можливість відтворювання складних нелінійних залежностей за великої кількості вхідних параметрів. Даний метод має можливість адаптації до змін у вхідних даних, яка дозволяє їм працювати в правильному режимі весь час.

Недоліком методу є те, що часові витрати на виконання процедури навчання часто не дозволяють застосовувати даний метод у системах реального часу. При застосуванні запропонованої моделі виникає проблема підготовки навчальної вибірки, пов'язана з труднощами знаходження достатньої кількості навчальних прикладів.

У роботі [16] запропоновано метод пошуку оптимального місця розташування ТП на основі грубого випадкового пошуку. Це найпростіший і, в той же час найвідоміший алгоритм випадкового пошуку, що складається з рівномірного випадкового «кидання» точок у простір пошуку. Метод випадкового пошуку має дві переваги. По-перше, він придатний для будь-якої цільової функції, незалежно від того, є вона унімодальна чи ні. По-друге, ймовірність успіху при спробах не залежить від розмірності розглянутого простору. Хоча цей метод не дозволяє безпосередньо знайти оптимальне рішення, він створює сприятливі передумови для застосування в подальшому інших методів пошуку. Тому його краще застосовувати у поєднанні з одним або декількома методами інших типів.

У роботі [17] запропоновано метод пошуку місця розташування РП у поєднанні з підходом урахування чутливості до втрат потужності. Даний метод заснований на пошуку із заборонами, який належить до класу стратегій локального пошуку. Основна ідея техніки пошуку із заборонами – уникати циклів (відвідування одних і тих же рішень) у процесі пошуку, за допомогою списку заборон, що дозволяє не зупинятися в локальних оптимумах. У списку заборон зберігається інформація про історію пошуку у вигляді фіксованого числа переглянутих рішень. Ухвалення рішення на наступній ітерації залежить не тільки від його якості, але й від інформації про історію пошуку. На збереженні в списку заборон рішення накладається табу, й вони не можуть бути обрані при аналізі околиці. У цій техніці на кожній ітерації генерується повна околиця поточного рішення. Краще рішення (не табу) з околиці вибирається для наступної генерації. У роботі також був зроблений висновок про те, що використання запропонованого алгоритму дозволило отримати поліпшення стабільності напруги в розміщених ТП, порівняно з використанням алгоритму мурашиних колоній.

Перевага даного методу в тому, що він дозволяє продовжувати пошук після знаходження локального оптимуму, тим самим розширюючи простір пошуку, в надії знайти рішення, близьке до оптимального.

Недолік полягає в тому, що запропонований метод зупиняється при досягненні локального оптимуму. Для вирішення даного завдання необхідно шукати глобальний оптимум. Очевидно, що глобальний оптимум є також і локальним, але для успішного пошуку рішень обов'язково треба буде якось переходити від одного локального оптимуму до іншого, що не є зручним.

Аналіз робіт [4–17] дозволяє стверджувати, що проведення досліджень щодо оптимізації методів розміщення об’єктів електропостачання є доволі актуальною задачею. Було проведено порівняльний

аналіз точних і евристичних методів та встановлено, що точні методи показали хороші результати, але вони мають один дуже серйозний недолік. Час виконання роботи точних методів експоненційно зростає при збільшенні розмірності задачі. Для вирішення даного завдання це є неприйнятним, тому що для розрахунків вноситься великий обсяг даних про споживачів, ДЖ та типорозміри. Також проблемою класичних методів є складність в інтерпретації отриманих даних. Евристичні методи при збільшенні розмірності задачі дають кращі результати, порівняно з іншими методами за прийнятний час, але при цьому зменшується точність розрахунків. Також істотним недоліком виявилося те, що велика кількість евристичних методів створювалася під рішення невеликого ряду завдань, як правило, з однієї галузі знань. У результаті застосування будь-якого методу для вирішення іншої проблеми розміщення ДЖ стає дуже складним.

Отже, з метою вирішення проблем, що виникають при використанні досліджуваних методів, було прийнято рішення розробити модифікацію ГА для підвищення точності та зберігання швидкості розрахунків. У розроблюваному методі повинні були бути запропоновані спеціалізовані генетичні оператори схрещування й селекції, які ефективно вирішать проблему низького успадкування, топологічної нездійсненності знайдених рішень, у результаті чого значно скоротиться час виконання. Також у створюваному методі повинна бути реалізована відсутність обліку обмежень на розміщення нових ДЖ, яка дозволить вирішити проблему застосування методів для вузького кола завдань.

Мета й задачі дослідження

Мета дослідження – розробка математичної моделі вирішення завдання оптимального розміщення джерел живлення однакових і різних типорозмірів та одночасне закріплення за ними споживачів у системі електропостачання на основі евристичних методів.

Для досягнення мети дослідження необхідно було вирвішити такі завдання:

- розробити генетичний метод розміщення декількох джерел живлення одного типорозміру та одночасне закріплення за ними споживачів;
- розробити генетичний метод розміщення декількох джерел живлення різного типорозміру та одночасне закріплення за ними споживачів;
- представити експериментальне дослідження запропонованих генетичних методів розміщення ДЖ.

Розробка генетичних методів розміщення ДЖ однакових та різних типорозмірів у розподіленій електронній мережі

У даній роботі розглядається проблема обґрунтування розвитку складних розподільних систем електропостачання як ієрархія завдань, на першому етапі якої вирішуються завдання вибору раціональної конфігурації електромережі. Одним із основних завдань першого етапу при побудові раціональної конфігурації електромережі є розміщення n ДЖ та закріплення за ними споживачів.

Нехай в декартовій системі координат на площині задана система точок з координатами $\{x_i, y_i\}$, $i = \overline{1, m}$, які відповідають місцям підключення навантажень (споживачів). Множина $I = \{1, 2, \ldots, m\}$ – множина пунктів підключення вузлів навантажень (споживачів). Кожен вузол навантаження характеризується повною споживаною потужністю P_i. Множина $\{P_i\}$ визначає об'єм електроспоживання. Отже, сумарна споживана потужність $P_{sum.con}$ всіма споживачами визначається за формулою (1) [18]:

$$P_{sum.con} = \sum_{i=1}^{m} P_i . \quad (1)$$

Нехай також у декартовій системі координат задана система точок з координатами $\{x_j,y_j\}$, $j = \overline{1, n}$ можливих місць розміщення джерел живлення, що становлять

множину $J = \{1, 2, \ldots, n\}$. У розглянутій постановці передбачається, що це число n свідомо більше практично необхідного числа місць розміщення ДЖ. Так, наприклад, у задачі слід визначити не більше 6 місць розміщення ДЖ, а можливих місць розміщення можна вказати декілька десятків [18].

Представимо типовий ряд використовуваних для вирішення завдання джерел електричної потужності (джерел живлення). Нехай даний типовий ряд має вигляд множини $\{P^1, P^2, \ldots, P^t\}$, де t – кількість різних типорозмірів ДЖ.

Значить, сумарна потужність $P_{sum.give}$, що віддається ДЖ, визначається за формулою (2):

$$P_{sum.give} \geq P_{sum.con} + P_{\min}, \tag{2}$$

де $P_{\min}$ – потужність найменшого ДЖ, що бере участь у вирішенні даного завдання.

Другою умовою для вибору $P_{sum.give}$ є те, щоб ця величина містила в собі ціле число доданків, а кожний доданок дорівнює обсягу виробництва електричної енергії, розглянутих у даній задачі типорозмірів ДЖ [18].

Розглянемо на прикладі простої задачі побудови раціональної конфігурації електромережі [19]. В умові задачі, сумарна споживана потужність дорівнює 23 МВт та відомо, що типовий ряд включає в себе джерела живлення наступних потужностей: 4 МВт, 6 МВт, 12 МВт. Отже, по заданому типовому ряду, $P_{sum.give} = 24$ МВт [19].

Виходячи зі знайденої величини $P_{sum.give}$ і заданих типорозмірів джерел живлення, знайдемо всі можливі варіанти комбінацій, за умови розміщення одного ДЖ в одній із можливих точок (це дуже важлива умова, в іншому випадку просто потрібно додати до використовуваного типового ряду інші ДЖ, потужність яких може бути подвоєна, збільшена втричі і т. д., залежно від типорозмірів, що використовуються спочатку). За відомими даними сформулюємо деяку множину варіантів комбінацій кількості й типорозмірів джерел живлення для покриття $P_{sum.give}$:
$4 \cdot 6 = 24$, $6 \cdot 2 + 4 \cdot 3 = 24$,
$12 \cdot 1 + 4 \cdot 3 = 24$, $6 \cdot 2 + 12 \cdot 1 = 24$,
$6 \cdot 4 = 24$, $12 \cdot 2 = 24$ [6].

У варіантах перший множник добутку вказує потужність у МВт джерела живлення, другий множник показує кількість джерел живлення даного типорозміру. Як випливає з описаних вище варіантів, у першому випадку для розміщення ДЖ знадобиться шість можливих місць, у другому – п'ять і т. д., нарешті, в останньому варіанті знадобиться два можливих місця розміщення ДЖ [19].

Пронумеруємо всі ці варіанти й отримаємо в результаті множину $V = \{1, 2, \ldots, v\}$. Кожен елемент цієї множини однозначно визначає кількість місць розміщення для кожного типорозміру ДЖ, який бере участь у даному варіанті електропостачання [19].

З урахуванням усього вищевикладеного, маємо наступну оптимізаційну задачу: потрібно вибрати найбільш економічний варіант розміщення ДЖ з урахуванням витрат на доставку електроенергії до споживачів, причому слід вибрати наступні параметри:

– варіант i з множини $V = \{1, 2, \ldots, v\}$ можливих комбінацій кількості й типорозмірів джерел живлення;
– місця розміщення джерел живлення із запропонованих n можливих місць розміщення;
– для кожного споживача визначити, за яким джерелом живлення він буде закріплений [17–19].

Загальна постановка задачі зводиться до мінімізації цільової функції F, яка виражає витрати на передачу електроенергії з пунктів виробництва в пункти споживання (3):

$$F = \min\left(\sum_{i \in I}\sum_{j \in J} P_i C_{ij} d_{ij}\right), \tag{3}$$

де P_i – значення переданої потужності; d_{ij} – відстані від джерела живлення j до споживача i; C_{ij} – питомі приведені витра-

ти для передачі одиниці потужності на одиницю відстані [17–19].

При цьому приймається припущення, що електрична мережа не обмежує передачу потужності від джерела живлення до споживача [19].

Надалі буде вважатися, що електрична мережа має радіальну структуру, яка характерна при експлуатації багатьох систем електропостачання, а також приведені питомі витрати $C_{ij} = 1$, тобто цільова функція приймає вид (4) [17–19]:

$$F = \min\left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} P_i d_{ij}\right), \quad (4)$$

При цьому відстань від ДЖ до споживача обчислюється, відповідно до метрики Евкліда, за формулою (5):

$$d_{ij} = \sqrt{\left(x_i - x_j\right)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2}, \quad (5)$$

де (x_i, y_i) – координати споживача $i = \overline{1, m}$; (x_j, y_j) – координати розміщення ДЖ $j = \overline{1, n}$ [19].

У класичному випадку це завдання вирішують за допомогою методів комбінаторного аналізу. Будь-які комбінаторні обчислення вимагають попереднього аналізу трудомісткості рішення задачі і використовуваних алгоритмів її рішення. Завдання зазвичай оцінюються з точки зору розмірності, тобто загальної кількості різних варіантів, серед яких потрібно знайти найкраще рішення, а алгоритми оцінюються з точки зору складності. Отже, вирішувальне завдання можна віднести до класу задач великої розмірності [20].

Крім цього, у даному завданні виникає необхідність вирішення оптимізаційної задачі, оптимізуючи одночасно відразу декілька параметрів, тобто вирішувальне завдання відноситься до класу задач багатопараметричної оптимізації [20].

Застосування класичних методів рішення переборних задач не приводить в даному випадку до вирішення завдання за прийнятний час. Тому виникає необхідність у застосуванні нових підходів для вирішення завдання. Для вирішення даного завдання було прийнято рішення використовувати еволюційні методи [20], які, порівняно з методами повного перебору, дозволять скоротити обчислювальні витрати й вирішити задачу оптимізації швидше та ефективніше.

Перший створений метод полягає в розміщенні ДЖ однакового типорозміру та одночасного закріплення за ними споживачів. Розглянемо нижче більш детально структуру розробленого методу розміщення джерел електричної потужності однакового типорозміру.

Формування початкової популяції

Формування початкової популяції є першим етапом у реалізації генетичного алгоритму. Початкова популяція створюється шляхом випадкової генерації хромосом, причому пристосованість хромосом не є важливим показником на даному етапі. Таким чином, початкова популяція може бути абсолютно не конкурентоспроможна, проте, в ході роботи алгоритму, популяція стане більш пристосованою [21].

Генетичний алгоритм за один крок робить обробку деякої популяції. Популяція $G(t)$ на кроці t являє собою кінцевий набір рядків (6):

$$G(t) = \left(S_1^t, S_2^t, \ldots, S_K^t\right), \quad (6)$$

де S_K^t – хромосома (особина); K – число хромосом у популяції, причому хромосоми в популяції не повинні повторюватися [22].

Формування початкової популяції пов’язано з представленням параметрів завдання в формі хромосом, у нашому випадку в початковій популяції повинні обов’язково бути присутні всі можливі місця розміщення ДЖ, тобто всі точки з множини $J = \{1, 2, \ldots, n\}$. Хромосома представляє собою деяке рішення завдання. За ген – одиницю спадкового матеріалу, відповідального за формування альтер-

нативних ознак хромосоми, приймемо місце розміщення ДЖ. Довжина хромосоми буде дорівнювати кількості можливих місць розміщення ДЖ. Кожна хромосома містить *n* зчеплених між собою генів, які слідують один за одним, що представлені у вигляді формули (7):

$$p(x) = (p_1, p_2, .., p_n) \tag{7}$$

де p_n – місце розміщення ДЖ [22].

Ген особини S_k^t будемо позначати g_k^t за формулою (8):

$$g_n^t = g(S_k^t) = (g_1(S_k^t), g_2(S_k^t), ..., g_n(S_k^t)) \tag{8}$$

де S_k^t – особина; t – деякий момент часу еволюційного процесу; k – номер особини $k = \{1, 2, …, K\}$.

Розглянемо варіант електропостачання, де ДЖ однакових типорозмірів, які покривають повністю потреби споживачів електричної енергії. Допустимо, це буде N – число однакових ДЖ, що беруть участь в електропостачанні даного району, та число P – типорозмір ДЖ. Хромосома складається з двох рядків: значення та можливі місця розташування ДЖ. Рядок значення є бітовим рядком та кількість одиниць у даному рядку має дорівнювати числу N, тобто кількості необхідних ДЖ для електропостачання району. Одиниця означає, що в даному місці знаходиться ДЖ, а нуль – те, що його немає. У другому рядку позначено, у якому місці знаходиться вибране ДЖ.

У процесі генетичного пошуку може виникнути ситуація значного розкиду значень цільової функції хромосом популяції, що призводить до надмірного зменшення ймовірності відбору більшості хромосом для схрещування [23].

Для подолання цієї проблеми необхідно привести значення цільової функції хромосом у популяції до єдиного порядку. Для цього цільова функція F відображається в фітнес-функцію f шляхом перерахунку її значень для кожної хромосоми за формулою (9):

$$f(S_k^t) = F(S_k^t) - F_{\min}, \tag{9}$$

де $F(S_k^t)$ – значення цільової функції k-тої хромосоми, де $k = \{1, 2, …, K\}$; $F_{\min}$ – найменше значення цільової функції [24].

Відбір хромосом-батьків для схрещування відбувається на основі значення цільової функції так, щоб з ненульовою ймовірністю будь-який елемент популяції міг би бути вибраний як один з батьків для схрещування.

У даному методі відбір хромосом здійснюється за допомогою лінійного ранжування. Для цього спочатку було обчислено пристосованість кожної особини $f(S_k^t)$ за формулою (9), потім було відсортовано популяцію за збільшенням пристосованості особин. Далі для кожної особини було обчислено величину $P_{sl}(Pos)$ за формулою (10):

$$P_{sl}(Pos) = 2 - SP + 2 \cdot (SP - 1) \cdot \frac{Pos - 1}{K - 1}, \tag{10}$$

де Pos – позиція хромосоми в популяції (найменш пристосовані хромосоми мають $Pos = 1$, а найбільш пристосовані - мають позицію, що дорівнює K); SP – коефіцієнт тиску селекції, який може набувати значення в межах (1; 2) [25].

Під час тестування методу встановлено, що краще застосовувати $SP = 1{,}6$ та $P_{sl}(Pos) = 0{,}58$. Якщо $P_{sl}(Pos) > 0{,}58$, то хромосома підходить до схрещування.

Щоб обчислити значення цільової функції для кожного варіанту розміщення ДЖ, необхідно спочатку закріпити кожного споживача за ДЖ.

У роботі було створено метод закріплення споживачів за ДЖ, він враховує два основні фактори: величину переданої потужності та відстані. Метод закріплення споживачів за ДЖ однакових типорозмірів полягає у виконанні двох умов: відстань від споживача до обраного ДЖ – найкоротша, порівняно з іншими ДЖ, та сумарна потужність споживачів, закріплених за обраним ДЖ, не перевищує його

потужності. Якщо ці дві умови виконуються, то i-тий споживач закріплюється за обраним ДЖ.

Оператор схрещування, так званий кросовер, є основним генетичним оператором, за рахунок якого проводиться обмін генетичним матеріалом між особинами. Оберемо варіант схрещування, у якому для створення нової дочірньої хромосоми завжди беруть участь дві хромосоми [26].

Продемонструємо роботу оператора схрещування на прикладі завдання, де необхідно розмістити 6 ДЖ для покриття сумарної потужності споживачів з десяти можливих місць розміщення ДЖ.

Спочатку випадковим чином виберемо дві неоднакові хромосоми зі створеної популяції.

Кількість одиниць у перших рядках обох хромосом має бути однакова та дорівнювати числу необхідних ДЖ для покриття сумарної потужності споживачів.

Після цього хромосоми порівнюють, чи є у них однакові гени, тобто однакові місця розміщення ДЖ. Як можна побачити з табл. 2 та табл. 3, це – гени один, три, десять. Ці гени передаються в хромосоми нащадків без зміни. Генетична інформація, яка присутня в хромосомах обох батьків, має набагато більшу ймовірність бути переданою нащадкам. Будемо припускати, що ця інформація передається зі 100% вірогідністю. Далі стискаємо обрані хромосоми, відкидаючи знайдені однакові гени та місця, в яких немає ДЖ (значення, що дорівнює нулю).

Кількість одиниць у перших рядках обох хромосом має бути однакова та дорівнювати числу необхідних ДЖ, для покриття сумарної потужності споживачів.

Наступним кроком було застосування одноточкового кросинговеру. Випадковим чином визначається позиція гена (точка розриву) в хромосомі, яка ділить обидві хромосоми на дві частини. Оскільки хромосома кожного з батьків складається з n генів, то, очевидно, що точка схрещування n_k є натуральним числом, яке менше n [26]. Отже, визначення точки розриву зводиться до випадкового вибору числа з інтервалу $[1, n – 1]$. Нехай, наприклад, це буде точка між першим і другим геном. У результаті схрещування пари батьківських хромосом виходить така пара нащадків:

– нащадок, хромосома якого на позиціях від одного до n_k складається з генів першого з батьків, а на позиціях від $n_k + 1$ до n – з генів другого з батьків [26];
– нащадок, хромосома якого на позиціях від одного до n_k складається з генів другого з батьків, а на позиціях від $n_k + 1$ до n – з генів першого з батьків [26].

Отже, якщо нащадкам передати однакові гени батьків, то нащадки успадкують сильніші гени, а стиснення хромосоми значно спрощує операцію схрещування [26].

Реалізація операції мутації полягає у випадковій зміні генотипу дочірніх елементів, визначених на попередньому етапі. Найпростіший варіант мутації полягає у випадковій зміні одного або більше генів. У генетичному алгоритмі мутація відіграє важливу роль для відновлення генів, що випали з популяції в ході операції вибору, з тим, щоб вони могли бути використані в нових популяціях. Крім цього, вона дозволяє формувати гени, які не були представлені у вихідній популяції [27]. У розроблюваному методі для кожної особини випадковим чином вибирається один ненульовий ген та один нульовий ген, після чого їх бінарні значення змінюються на протилежні. Продемонструємо реалізацію оператора мутації на прикладі хромосоми D. Нехай випадковим чином обрано другий та сьомий ген для мутації.

Формування нового покоління

Після схрещування й мутації необхідно створити нову популяцію. Види операторів формування нового покоління (репродукції) практично співпадають з видами операторів відбору батьків, що передбачають формування проміжного ма-

сиву особин, допущених до схрещування [27].

Необхідно визначити, які з нових особин увійдуть до наступного покоління, а які ні. Серед найбільш поширених операторів відбору було обрано пропорційний відбір, що реалізується методом рулетки з умов простоти реалізації та невеликих обчислювальних витрат, з огляду на складний характер функції пристосування [27].

Спочатку було визначено середнє арифметичне значення фітнес-функції f_{am} популяції всіх K особин за формулою (11) [27]:

$$f_{am} = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} f\left(S_k^t\right) \quad (11)$$

Далі проводилося обчислення для кожної особини: наступне відношення за формулою (12) [27]:

$$f_r\left(k\right) = \frac{f\left(S_k^t\right)}{f_{am}}. \quad (12)$$

Відбір особин відбувається за допомогою r запусків рулетки, що дорівнюють кількості особин у початковій популяції, вказаній користувачем. Колесо рулетки містить по одному сектору для кожної особи популяції. Розмір r-го сектора пропорційний величині $f_r(k)$. Особина потрапляє в нову популяцію, якщо випадково згенероване число в межах від нуля до 2π потрапляє в сектор, що відповідає цій особині. При такому відборі члени популяції з вищою пристосованістю з більшою ймовірністю частіше вибиратимуться, ніж особини з низькою пристосованістю [28].

Розроблюваний метод зупиняє свою роботу при досягненні максимального числа епох функціонування, яке задається користувачем.

Отже, запропоновано модифікацію метода розміщення об’єктів електропостачання у випадку однакового типорозміру джерел електричної потужності. Розроблений метод заснований на принципах еволюційного моделювання й генетичного програмування. Даний метод реалізує розміщення декількох ДЖ однакових типорозмірів та одночасне закріплення споживачів за цими ДЖ. Він дозволяє здійснювати рівномірний розподіл споживачів електричної потужності між ДЖ та скорочувати відстань від ДЖ до споживачів.

Друга модифікація ГА полягає у реалізації розміщення ДЖ різних типорозмірів та одночасне закріплення за ними споживачів. Продемонструємо структуру розроблюваного методу розміщення ДЖ різних типорозмірів на прикладі завдання. В умові задачі сумарна споживана потужність дорівнює 23 МВт та відомо, що типовий ряд включає в себе джерела живлення наступних потужностей: 4 МВт, 6 МВт, 12 МВт. Отже, по заданому типовому ряду Psum.give = 24 МВт [19]. Вхідними даними є можливі місця розміщення ДЖ, типорозміри використовуваних ДЖ, всі можливі варіанти електропостачання та $P_{sum.give}$. У розглянутому прикладі 6 можливих варіантів електропостачання, причому у кожного варіанта своя необхідна кількість місць розміщення ДЖ. Впорядкуємо варіанти в порядку спадання необхідної кількості місць розміщення ДЖ.

Принцип формування початкової популяції

У даній постановці завдання в початковій популяції повинні обов’язково бути присутні всі можливі варіанти електропостачання з множини $V = \{1, 2, \ldots, v\}$, а також мають бути використані всі можливі місця розміщення ДЖ з множини $J = \{1, 2, \ldots, n\}$. Кожна хромосома буде містити інформацію про використовувану комбінацію кількості та типорозмірів ДЖ, а також інформацію про місця розміщення ДЖ для даного варіанту електропостачання.

Нехай $J = \{1, 2, \ldots, n\}$ – множина можливих місць розміщення ДЖ, у нашому випадку вона дорівнює десяти елементам. Довжина хромосоми дорівнює числу n – кількості можливих місць розміщення ДЖ. Кількість хромосом у початковій по-

пуляції має дорівнює числу v. Хромосома складається з трьох рядків: значення, можливі місця розташування ДЖ та потужність ДЖ. Рядок значення є бітовим рядком та сума одиниць в даному рядку повинна дорівнювати кількості використовуваних ДЖ у вибраному варіанті електропостачання. Сума чисел у третьому рядку повинна дорівнювати сумарній споживній потужності. Місцезнаходження відповідних одиниць у першому рядку та чисел у третьому рядку вибирається випадковим чином.

Відбір хромосом для схрещування здійснюється за допомогою рівномірного ранжування. Спочатку було обчислено пристосованість кожної особини $f(S_k^t)$ за формулою (9), потім було відсортовано популяцію за збільшенням пристосованості особин. Далі для кожної особини було обчислено величину $P_{sr}(S_k^t)$ за формулою (13):

$$P_{sr}\left(S_k^t\right)=\begin{cases}\frac{1}{w}, \text{ якщо } 1 \le k \le w \\ 0, \text{ якщо } w < k \le K\end{cases} \quad (13)$$

де w – число, що дорівнює $|K/2|$ [29].

Якщо $P_{sr}(S_k^t)$ не дорівнює нулю, то хромосома підходить до схрещування.

Щоб обчислити значення цільової функції для кожного варіанту розміщення ДЖ, необхідно спочатку закріпити кожного споживача за ДЖ.

У роботі було створено метод закріплення споживачів за ДЖ. Він враховує два основні фактори: величину переданої потужності та відстань від ДЖ та споживача. Перейдемо до описання методу закріплення споживачів за ДЖ різних типорозмірів. Спочатку треба впорядкувати потужності (ваги) споживачів у порядку спадання $S_1 \ge S_2 \ge \ldots \ge S_m$. Також впорядкувати потужності ДЖ, які використовуються для даного варіанту рішення в порядку спадання $P^1 \ge P^2 \ge \ldots \ge P^t$. Метод закріплення споживачів за ДЖ різних типорозмірів полягає у виконанні двох умов: відстань від споживача до обраного ДЖ – найкоротша, порівняно з іншими ДЖ, та сумарна потужність споживачів, закріплених за обраним ДЖ, не перевищує його потужності. Якщо ці дві умови виконуються, то i-тий споживач закріплюється за обраним ДЖ.

У методі розміщення ДЖ різних типорозмірів було вибрано варіант схрещування, в якому беруть участь дві хромосоми для створення нової дочірньої хромосоми [30]. Перед тим, як перейти до операції схрещування, необхідно було модифікувати хромосоми батьків. Для цього спочатку було поділено хромосоми батьків на найбільший спільний дільник за потужністю, а потім застосовано одноточковий кросинговер. Після цього було проаналізовано отримані хромосоми-нащадки та здійснено перерозподіл потужності по ДЖ, згідно з заданими варіантами типорозмірів для покриття споживної потужності.

Оператор мутації полягає в зміні генів у випадково вибраних позиціях. Він ініціює різноманітність у популяції, дозволяючи проглядати більше точок у просторі пошуку й долати, таким чином, локальні екстремуми в ході пошуку [30]. Мутація відбувається у такий спосіб: випадковим чином обирається число з другого рядка та замінюється на випадкове число з множини $J = \{1, 2, \ldots, n\}$, яке не дорівнює числам, що є вже в другому рядку.

Проведемо селекцію генетичного матеріалу за допомогою пропорційного відбору, що реалізується методом рулетки. Даний тип відбору вже застосовувався та описувався для методу розміщення ДЖ однакових типорозмірів. При такому відборі члени популяції з вищою пристосованістю з більшою ймовірністю частіше вибиратимуться, ніж особини з низькою пристосованістю. У результаті виконання операції селекції відбувається відбір найкращих хромосом для створення нової популяції. Число запусків рулетки дорівнює кількості особин у початковій популяції, отже, нова

популяціє буде мати такий же розмір, як початково створена.

Розроблюваний метод зупиняє свою роботу при досягнені максимального числа епох функціонування, яке задається користувачем.

Отже, запропоновано модифікацію методу розміщення об'єктів електропостачання у випадку різних типорозмірів джерел електричної потужності. Розроблений метод заснований на принципах еволюційного моделювання й генетичного програмування. Даний метод реалізує розміщення декількох ДЖ різних типорозмірів та одночасне закріплення споживачів за цими ДЖ. Він дозволяє здійснювати рівномірний розподіл споживачів електричної потужності між ДЖ та скорочувати відстань від ДЖ до споживачів.

Результати роботи генетичного методу розміщення ДЖ однакових та різних типорозмірів у міській розподільній мережі

Протестуємо розроблений метод за наступних параметрів: кількість особин у початковій популяції *NumberOfChromosomes* = 200 та число ітерацій методу *NumberOfIterations* = 200. На рис. 1 та на рис. 2 представленні результати роботи розроблюваного методу.



Рис. 1. Графік зміни цільової функції (*NumberOfChromosomes* = 200, *NumberOfIterations* = 200)

На рис. 1 представлено графік зміни значення цільової функції при переході з однієї популяції до іншої. На ньому чітко спостерігається поступове зниження значення цільової функції. Як видно з рис. 1, в середньому, починаючи з 90 популяції, значення цільової функції припиняє зменшуватися та становить $7{,}415 \cdot 10^5$. Це означає, що відбувається збіг методу та вихід на глобальний мінімум.

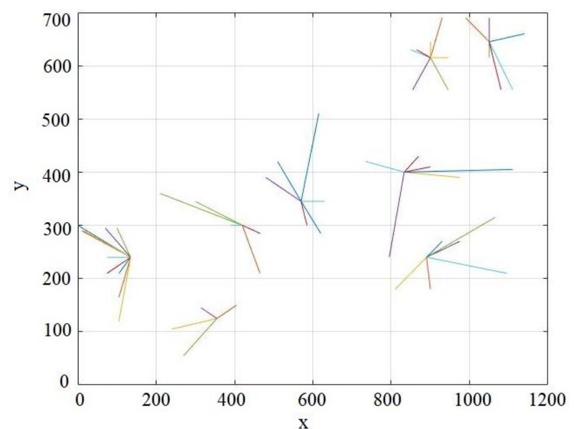


Рис. 2. Графік закріплення споживачів за ДЖ

Як видно з рис. 2, місця розташування ДЖ, видані при роботі розроблюваного методу при заданих вихідних даних: $X_1 = 833$, $Y_1 = 400$, $X_2 = 420$, $Y_2 = 300$, $X_3 = 890$, $Y_3 = 240$, $X_4 = 240$, $Y_4 = 75$, $X_5 = 900$, $Y_5 = 615$, $X_6 = 1050$, $Y_6 = 645$, $X_7 = 135$, $Y_7 = 240$, $X_8 = 570$, $Y_8 = 345$.

Проведемо тестування розробленого методу, змінивши параметри у вхідних даних, а саме, прийнявши *NumberOfIterations* = 100 та *NumberOfChromo* = 250.

Графік зміни цільової функції при *NumberOfChromo* = 250, *NumberOfPovtoremi* = 100 представлений на рис. 3.

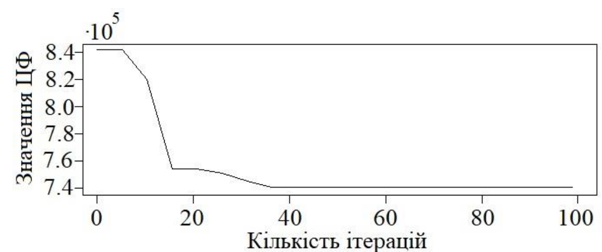


Рис. 3. Графік зміни цільової функції (*NumberOfChromosomes* = 250, *NumberOfIterations* = 100)

Як видно с рис. 3, спостерігається схожа з попереднім тестуванням ситуація – поступове зниження цільової функції. Враховуючи попереднє тестування методу, було обрано 100 популяцій для випробування розробленого методу. Наприкінці

тестування спостерігається збіжність методу та зупинення зниження цільової функції.

Закріплення споживачів електричної потужності за ДЖ, отримане в результаті роботи методу при заданих параметрах, представлено на рис. 4.

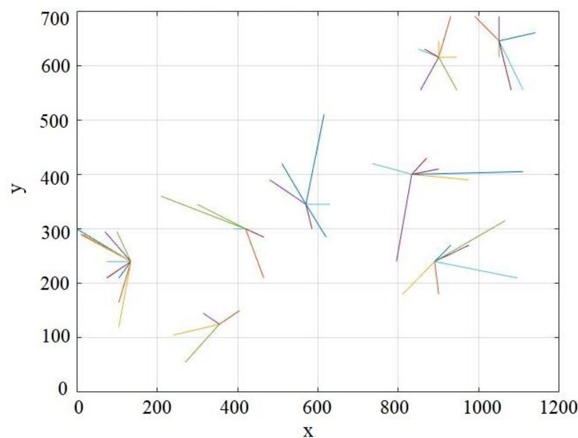


Рис. 4. Графік закріплення споживачів за ДЖ

Можна побачити, що на рис. 4 зображені місця розташування ДЖ, видані при роботі розроблюваного методу при заданих вхідних даних: $X_1 = 833$, $Y_1 = 400$, $X_2 = 420$, $Y_2 = 300$, $X_3 = 890$, $Y_3 = 240$, $X_4 = 240$, $Y_4 = 75$, $X_5 = 900$, $Y_5 = 615$, $X_6 = 1050$, $Y_6 = 645$, $X_7 = 135$, $Y_7 = 240$, $X_8 = 570$, $Y_8 = 345$.

Проаналізуємо роботу методу за таких параметрів: *NumberOfChromo* = 400, *NumberOfPovtorenii* = 100, тобто збільшимо в декілька разів кількість особин у популяції. При цьому отримуємо результати, представлені на рис. 5 та на рис. 6.

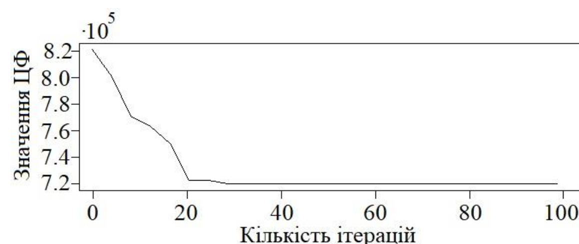


Рис. 5. Графік зміни цільової функції від популяції (*NumberOfChromosomes* = 400, *NumberOfIterations* = 100)

На рис. 5 показано графік зміни значення цільової функції при переході з однієї популяції до іншої, на якому спостерігається поступове зниження значення цільової функції. Починаючи з 30 популяції, спостерігається відсутність подальшого зменшення значення цільової функції, що становить $7{,}22 \cdot 10^5$, тому можна вважати, що під час тестування досягнуто глобальний мінімум значення цільової функції. Порівнюючи результати, що представлені на рис. 1 та на рис. 3, можна побачити, що збіжність методу зростає при збільшенні числа особин у початковій популяції. Під час тестування встановлено, що пошук найкращого рішення, при якому значення цільової функції є найменшим, залежить від вибраної кількості особин у популяції. Чим більша популяція, тим більше шансів знайти найкращий варіант розміщення ДЖ та закріплення за ними споживачів.

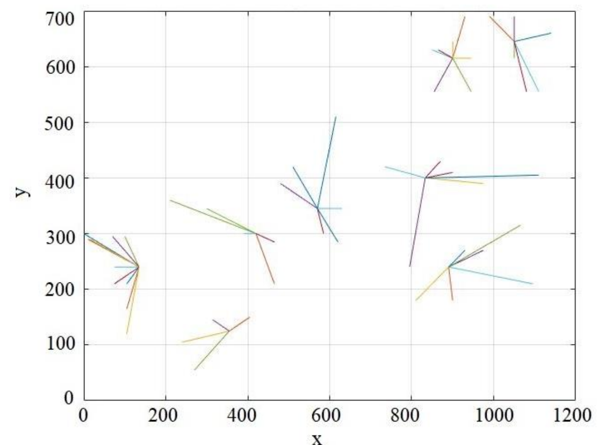


Рис. 6. Графік закріплення споживачів за ДЖ

На рис. 6 зображені місця розташування ДЖ, видані при роботі генетичного методу при заданих вхідних даних: $X_1 = 833$, $Y_1 = 400$, $X_2 = 420$, $Y_2 = 300$, $X_3 = 890$, $Y_3 = 240$, $X_4 = 355$, $Y_4 = 125$, $X_5 = 900$, $Y_5 = 615$, $X_6 = 1050$, $Y_6 = 645$, $X_7 = 135$, $Y_7 = 240$, $X_8 = 570$, $Y_8 = 345$.

Проведемо порівняльний аналіз отриманих результатів роботи методу розміщення ДЖ однакового типорозміру та одночасного закріплення за ними споживачів при різній кількості ітерацій та хромосом у початковій.

Як видно з табл. 1, спочатку проводилося тестування розробленого методу з початковою популяцією, яка складається з 200 особин. Кількість ітерацій у даному експерименті дорівнює 200 разів. На осно-

ві чого було отримано значення цільової функції, яке дорівнює $7{,}415\cdot10^5$ та час виконання методу, що становить 96,063 с. Потім було зменшено кількість ітерацій до 100 разів та збільшено кількість особин в початковій популяції до 250 особин. Внаслідок чого було отримано значення цільової функції, яке дорівнює $7{,}413\cdot10^5$ та час виконання, що становить 96,153 с. Таким чином, порівнюючи ці два експерименти, можна побачити, що значення цільової функції та час розрахунку сильно не змінилися. У третьому досліді було збільшено початкову популяцію до 400 особин та незмінним залишено кількість ітерацій алгоритму. Після чого було отримано зменшення цільової функції до $7{,}22\cdot10^5$ та збільшення часу розрахунку до 153,201 с. Отже, результати аналізу демонструють, що час роботи методу зростає зі збільшенням кількості хромосом у початковій популяції та зменшується значення цільової функції. При цьому залежність часу роботи методу від числа ітерацій при постійній кількості хромосом у початковій популяції виражено набагато слабше. Результати цих трьох експериментів показують, що час пошуку рішення методу більшою мірою залежить від числа хромосом у початкової популяції, і меншою мірою від числа ітерацій методу. Ця різниця обумовлена тим, що довжина хромосом визначається кількістю можливих місць розміщення ДЖ, які присутні в завданні.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз режимів роботи методу розміщення ДЖ однакового типорозміру

Кількість хромосом у початковій популяції	200	250	400
Кількість ітерацій	200	100	100
Значення ЦФ	$7{,}415\cdot10^5$	$7{,}413\cdot10^5$	$7{,}22\cdot10^5$
Час, с	96,063	96,153	153,201

Найбільш важливим є питання, наскільки добре розроблений метод шукає рішення задачі. Для цього було проведено порівняльний аналіз результатів розробленого методу з такими методами як, класичний ГА, алгоритм повного перебору, метод гілок та границь, метод мурашиних колоній. Критеріями оцінювання були значення цільової функції та час виконання (табл. 2).

Таблиця 2. Порівняльний аналіз результатів розробленого методу розміщення ДЖ однакових типорозмірів

Критерії	Розроблений метод	Класичний ГА	Алгоритм повного перебору	Метод гілок та границь	Метод мурашиних колоній
Значення ЦФ	$7{,}223\cdot10^5$	$12{,}234\cdot10^5$	$6{,}534\cdot10^5$	$6{,}912\cdot10^5$	$6{,}925\cdot10^5$
Час, с	153,201	123,156	17204,466	16928,546	16582,523

Можна побачити з табл. 2, що розроблений метод має виграш у часі розрахунку, порівняно з точними методами. Наприклад, час обчислення алгоритму повного перебору становить 17240,466 с, що набагато більше, ніж у розробленої модифікації, у якої час розрахунку дорівнює 153,201 с. Також спостерігається, що значення цільової функції методу розміщення ДЖ однакових типорозмірів є близьким до значень цільової функції точних методів. Наприклад, значення цільової функції у методу гілок та границь дорівнює $6{,}912\cdot10^5$, а у запропонованого методу – становить $7{,}223\cdot10^5$. Порівнюючи розроблену модифікацію та класичний ГА, можна побачити, що розроблений метод показує кращі значення цільової функції, але при цьому він використовує більше часових ресурсів, оскільки оператори схрещу-

вання й мутації з імовірністю 100% застосовуються для всіх особин покоління по черзі, на відміну від класичного ГА. Крім того, в задачах невеликої розмірності розроблений метод розміщення ДЖ однакових типорозмірів отримує рішення, дуже близькі до точних.

Продемонструємо роботу розроблюваного методу розміщення ДЖ різних типорозмірів на прикладі завдання [18], де необхідно вибрати найбільш економічний варіант розміщення ДЖ. В умові завдання відомо, що $P_{sum.con} = 3300$, $P_{sum.give} = 3450$, типовий ряд включає в себе ДЖ наступних потужностей: 50 кВт, 100 кВт, 500 кВт, 1150 кВт, а також відомі варіанти комбінацій кількості й типорозмірів: $1150 \cdot 2 + 500 \cdot 2 + 100 \cdot 1 + 50 \cdot 1 = 3450$, $1150 \cdot 3 = 3450$, $500 \cdot 4 + 100 \cdot 3 + 1150 \cdot 1 = 3450$ [18]. Вхідними даними також будуть координати можливих місць розміщення ДЖ та координати споживачів електричної енергії [18].

Запустимо роботу методу, вказавши *NumberOfPovtorenii* = 100. При цьому отримуємо наступні результати, представлені на рис. 7 та рис. 8.



Рис. 7. Графік зміни цільової функції (*NumberOfIterations* = 100)

На рис. 7 представлено графік зміни значення цільової функції при переході з однієї популяції до іншої, на якому чітко спостерігається поступове зниження значення цільової функції. Як видно з рис. 7, в середньому, починаючи з 45 популяції, значення цільової функції припиняє зменшуватися та становить $2{,}08 \cdot 10^5$. Це означає, що відбувається збіг методу та вихід на глобальний мінімум.

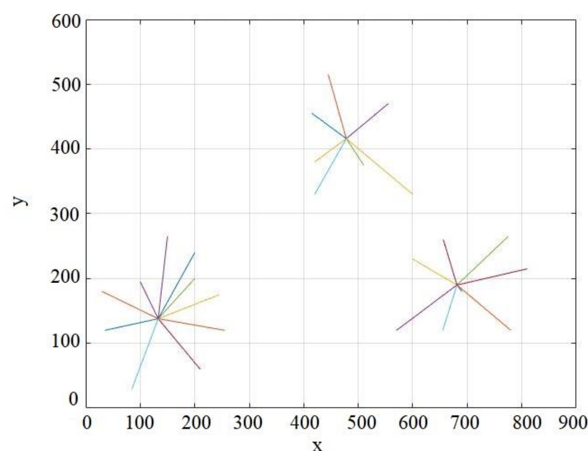


Рис. 8. Графік закріплення споживачів за ДЖ

Як видно з рис. 8, місця розташування ДЖ видані при роботі методу при заданих вхідних даних: $X_1 = 130$, $Y_1 = 138$, $X_2 = 479$, $Y_2 = 417$, $X_3 = 681$, $Y_3 = 191$, що відповідають третьому варіанту комбінацій кількості й типорозмірів ДЖ. Отже, найкращим рішенням є розміщення трьох ДЖ у отриманих місцях потужністю 1150 кВт .

Проведено порівняльний аналіз результатів розробленого методу з такими методами, як класичний ГА, алгоритм повного перебору, метод гілок та границь, метод мурашиних колоній. Критеріями оцінювання були значення цільової функції та час виконання (табл. 3).

Таблиця 3. Порівняльний аналіз результатів розробленого методу розміщення ДЖ різних типорозмірів

Критерії	Розроблений метод	Класичний ГА	Алгоритм повного перебору	Метод гілок та границь	Метод мурашиних колоній
Значення ЦФ	$2{,}081 \cdot 10^5$	$4{,}110 \cdot 10^5$	$1{,}836 \cdot 10^5$	$1{,}976 \cdot 10^5$	$1{,}921 \cdot 10^5$
Час, с	204,265	163,924	19055,562	18564,431	18621,233

Можна побачити з табл. 3, що розроблений метод має виграш у часі розрахунку, порівняно з точними методами. Наприклад, час обчислення алгоритму методу мурашиних колоній становить 10,233 с, що набагато більше, ніж у розробленої модифікації, у якої час розрахунку дорівнює 4,265 с. Також спостерігається, що значення цільової функції методу розміщення ДЖ різних типорозмірів близьке до значень цільової функції точних методів. Наприклад, значення цільової функції у алгоритму повного перебору дорівнює $2{,}110 \cdot 10^5$, а у запропонованого методу – становить $2{,}081 \cdot 10^5$. Порівнюючи розроблену модифікацію та класичний ГА, можна побачити, що розроблений метод показує кращі значення цільової функції, але при цьому він використовує більше часових витрат, оскільки оператори схрещування й мутації з імовірністю 100% застосовуються для всіх особин покоління по черзі, на відміну від класичного ГА. Крім того, в задачах невеликої розмірності розроблений метод розміщення ДЖ різних типорозмірів отримує рішення, дуже близькі до точних.

Обговорення результатів розробки генетичного методу розміщення джерел живлення однакових та різних типорозмірів

Аналізуючи отримані результати експериментів (табл. 2), можна побачити, що, на відміну від точних методів для задач малої та середньої розмірності, час розрахунку за допомогою розробленого методу є набагато меншим. Це можна побачити, порівнюючи, наприклад, метод повного перебору, у якого час розрахунку становить 17240,466 с, та створеного методу розміщення ДЖ однакових типорозмірів, у якого час пошуку рішення дорівнює 153,201 с. Таким чином, експериментальні дані в табл. 5 вказують на те, що створений метод розміщення ДЖ однакових типорозмірів працює на 10,3% швидше, ніж точні методи. Також з тестових розрахунків у табл. 2 видно, що середня похибка значення цільової функції, визначеної запропонованим методом, не перевищує значення 0,064 по відношенню до значення цільової функції, встановленої точними методами. У таблиці 1 представлено порівняльний аналіз створеного методу та класичного ГА, який доводить, що розроблений метод показує набагато кращі значення цільової функції, але при цьому він використовує більше часових ресурсів.

Була проведена оцінка часу розрахунку та значення цільової функції, залежно від указаних параметрів методу розміщення ДЖ однакових типорозмірів. У результаті чого було встановлено, що пошук найкращого рішення залежить, більшою мірою, від розміру початкової популяції й меншою мірою від кількості ітерацій. Як видно з рис. 3 при зменшенні числа ітерацій процес збіжності до єдиного рішення йде повільніше. У ході численних експериментів відзначена плавна збіжність рішення до результату, яка показана на рис. 3, при збільшенні розміру початкової популяції. Зсув цього параметра настройки методу в бік збільшення підвищує якість одержуваного рішення, але при цьому збільшуються витрати машинного часу, необхідні для отримання результату, як це демонструється в табл. 2. Вище викладені результати дозволяють зробити висновок про те, що з ростом кількості особин поліпшується точність генетичного алгоритму, але збільшується час розрахунку. Виходячи з отриманих даних, випливає, що найвища якість розміщення ДЖ досягається при максимально великому розмірі популяції. Але тут є істотний недолік, а саме – час роботи алгоритму, так як обчислювальна складність ГА безпосередньо залежить від кількості особин. При розмірі популяції, що дорівнює 1500 особин, досягається найкращий результат, але час роботи алгоритму не виправдовує цього поліпшення, тому рекомендований розмір популяції – 1000 особин.

Аналізуючи отримані результати експериментів (табл. 3), можна побачити, що швидкість пошуку рішення розробле-

ного методу розміщення ДЖ різних типорозмірів, порівняно з точними методами, в середньому на 9,8% вища. Також, аналіз отриманих тестових розрахунків показує, що модифікований ГА видає рішення, близьке до рішення, отриманого методом повного перебору, або рівне йому. З табл. 3 можна побачити, що середня похибка значення цільової функції, визначеної запропонованим методом, не перевищує значення 0,094 по відношенню до значення цільової функції, встановленого точними методами.

Було проведено дослідження залежності обраних параметрів методу й отриманих результатів та встановлено рекомендовані параметри, з якими генетичний метод розміщення ДЖ різних типорозмірів буде показувати найкращі результати. Рекомендована кількість поколінь – 70. У більшості випадків після 70-го покоління не спостерігалася зміна цільової функції (рис. 7).

Отже, підбиваючи вище сказане, можна стверджувати, що розроблені методи розміщення ДЖ однакових та різних типорозмірів дозволяють вирішити проблему завдання оптимізації знаходження глобально-оптимального рішення за прийнятний час. Це досягається за рахунок запропонованих специфічних генетичних операторів схрещування й селекції, які ефективно вирішують проблему низького успадкування, топологічної нездійсненності знайдених рішень, у результаті чого значно скоротився час виконання та підвищилася точність розрахунків.

Висновки

1. Розроблено генетичний метод для вирішення завдання оптимального розміщення ДЖ однакових типорозмірів та одночасне закріплення за ними споживачів. Принципова відмінність запропонованого методу від існуючих аналогів полягає в використанні модифікованого оператора селекції, який обирає хромосоми з популяції за допомогою передбачення якості потомства, що можуть дати вибрані хромосоми. Для цього оператор селекції враховує схему роботи оператора кросинговеру й мутації. Використання розробленого оператора селекції дозволяє виключати виникнення рішень, що не відповідають умові завдання й, тим самим, підвищити якість одержуваних рішень. Під час тестування даного методу було з'ясовано, що швидкість пошуку рішення, порівняно з методом повного перебору, більша на 12,3%, гілок та меж – на 10,5%, мурашиних колоній – на 8,2%. Також, аналіз отриманих тестових розрахунків показує, що модифікований ГА видає рішення, близьке до рішення, отриманого методом повного перебору, або рівне йому. Середня похибка значення цільової функції, визначеної запропонованим методом, не перевищує значення 0,105, по відношенню до значення цільової функції, встановленого методом повного перебору.
2. Розроблено генетичний метод для вирішення завдання оптимального розміщення ДЖ різних типорозмірів та одночасного закріплення за ними споживачів. Основна відмінність розробленого генетичного методу розміщення ДЖ різних типорозмірів від відомих генетичних алгоритмів полягає у використанні модифікованого оператора кросовера, у якому після визначення точки розриву відбувається перерозподіл генів. Тобто, у запропонованого оператора кросовера відбувається перерозподіл електричної енергії між джерелами живлення для зберігання балансу між сумарною споживаною потужністю й сумарною потужністю, що видається в мережу джерелом живлення. Також принципова відмінність пропонованого методу від існуючих аналогів полягає в застосуванні спільного оператора мутації для місця розташування та вироблюваної потужності джерела живлення. У такій ситуації повністю змінюватися буде потужність ДЖ, тому що зміна його місця розташування автоматично тягне за собою зміну потужності, що виробляється. Роз-

роблений метод використовує менші часові витрати на пошук оптимального рішення, що, порівняно з алгоритмом повного перебору, на 9,89% менше. Також аналіз отриманих тестових розрахунків показує, що модифікований ГА видає рішення, близьке до рішення, отриманого точними методами. Наприклад, значення цільової функції у алгоритмі повного перебору дорівнює 1,836·105, а у запропонованого методу – становить 2,081·105.

3. Виконано експериментальне дослідження запропонованих генетичних методів розміщення ДЖ однакових та різних типорозмірів. Результати досліджень показали, що створений метод розміщення ДЖ однакових типорозмірів працює на 10,3% швидше, ніж точні методи. Також, з тестових розрахунків видно, що середня похибка значення цільової функції, визначеної запропонованим методом, не перевищує значення 0,064 по відношенню до значення цільової функції, встановленого точними методами. Крім того, під час дослідження було виконано порівняльний аналіз створеного методу та класичного ГА, який довів, що розроблений метод показує набагато кращі значення цільової функції, але при цьому він використовує більше часових ресурсів. Значення цільової функції у класичного ГА дорівнює 12,234·105 та час розрахунку складає 123,156, а у запропонованого методу значення цільової функції становить 7,223·105 та час розрахунку дорівнює 153,201. Результати досліджень показали, що швидкість пошуку рішення розробленого методу розміщення ДЖ різних типорозмірів, порівняно з точними методами, в середньому на 9,8% вища. Також, аналіз отриманих тестових розрахунків показує, що модифікований ГА видає рішення, близьке до рішення, отриманого точними методами. Встановлено, що похибка значення цільової функції, визначеної запропонованим методом, не перевищує значення 0,094 по відношенню до значення цільової функції, визначеного точними методами.

References

1. Electricity Information 2019 [online] Availabe at: https://www.iea.org/reports/electricity-information-2019
2. Sedghi, M., Sedghi, M., Ahmadian, A., Aliakbar-Golkar, M., 2016. Assessment of optimization algorithms capability in distribution network planning: Review, comparison and modification techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, pp. 415–434.
3. Ravadanegh, S., Roshanagh, T. R., 2014. On optimal multistage electric power distribution networks expansion planning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 54, pp. 487–497.
4. Das, C., Bass, O., Kothapalli, G., Mahmoud, T., Habibi, D., 2018. Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, pp. 1205–1230.
5. Yu, L., Shi, D., Guo, X., Jiang, Z., Xu, G., Jian, G., Lei, J., Jing, C., 2018. An efficient substation placement and sizing strategy based on GIS using semi-supervised learning. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 4(3), 371-379. doi: 10.17775/cseejpes.2017.00800
6. Sultana, U., Khairuddin, A., Aman, M., Mokhtar, A., Zareen, N., 2016. A review of optimum DG placement based on minimization of power losses and voltage stability enhancement of distribution system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, pp. 363-378. doi: 10.1016/j.rser.2016.05.056.
7. Wang, X., Ahn, S., 2020. Real-time prediction and anomaly detection of electrical load in a residential community. *Applied Energy*, 259, p. 114-145. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114145
8. Parlier, G., Gueguen, H., Hu, F., 2019. Smart brute-force approach for distribution feeder reconfiguration problem. *Electric Power Systems Research*, 174, pp. 20–29.
9. Ning, J., Zhang, C., Sun, P., Feng, Y., 2018. Comparative Study of Ant Colony Algorithms for Multi-Objective Optimization. *Information*, 10 (1), pp. 4–11.
10. Chen, K., Xing, J., Wang, S., Song, M., 2017. Heat source layout optimization in two-dimensional heat conduction using simulated annealing method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, pp. 210-219. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.007
11. Bukata, L., Sucha, P., Hanzalek, Z., 2019. Optimizing energy consumption of robotic cells by a Branch & Bound algorithm. *Computers &*

Operations Research, vol. 102, pp. 52-66, 2019. doi: 10.1016/j.cor.2018.09.012.
12. Suresh, M., Edward, J., 2020. A hybrid algorithm based optimal placement of DG units for loss reduction in the distribution system. *Applied Soft Computing*, 91, p. 106-191, 2020. doi: 10.1016/j.asoc.2020.106191
13. Maity, S., Roy, A., Maiti, M., 2015. A Modified Genetic Algorithm for solving uncertain Constrained Solid Travelling Salesman Problems. *Computers & Industrial Engineering*, 83, pp. 273-296. Doi: 10.1016/j.cie.2015.02.023.
14. Salata, F., Ciancio, V., Dell'Olmo, J., Golasi, I., Palusci, O., Coppi, M., 2020. Effects of local conditions on the multi-variable and multi-objective energy optimization of residential buildings using genetic algorithms. *Applied Energy*, 260, pp. 127–135.
15. Sharifzadeh, M., Sikinioti-Lock, A., Shah, N., 2019. Machine-learning methods for integrated renewable power generation: A comparative study of artificial neural networks, support vector regression, and Gaussian Process Regression. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 108, pp. 513-538. DOI: 10.1016 / j.rser.2019.03.03.040
16. Parlier, G., Gueguen, H., Hu, F., 2019. Smart brute-force approach for distribution feeder reconfiguration problem. *Electric Power Systems Research*, 174, p. 105-137. doi: 10.1016/j.epsr.2019.04.015
17. Baya, A., Bagheri, A., 2019. Optimal active and reactive power allocation in distribution networks using a novel heuristic approach. *Applied Energy*, 233-234, pp. 71-85. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.030
18. Cheng, X., An, L., Zhang, Z., 2019. Integer Encoding Genetic Algorithm for Optimizing Redundancy Allocation of Series-parallel Systems. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 12(1), pp. 126-136. DOI: 10.25103/jestr.121.15
19. Ali, M., Awad, N., Suganthan, P., Shatnawi, A., Reynolds, R., 2018. An improved class of real-coded Genetic Algorithms for numerical optimization. *Neurocomputing*, 275, pp. 155-166, 2018. DOI: 10.1016/j.neucom.2017.05.054
20. Ruiz, L., Capel, M., Pegalajar, M., 2019. Parallel memetic algorithm for training recurrent neural networks for the energy efficiency problem. *Applied Soft Computing*, 76, pp. 356-368. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.12.028
21. Hong, T., Chen, C., Lin, F., 2015. Using group genetic algorithm to improve performance of attribute clustering. *Applied Soft Computing*, 29, pp. 371-378. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.01.001
22. Attar, M., Homaee, O., Falaghi, H., Siano, P., 2018. A novel strategy for optimal placement of locally controlled voltage regulators in traditional distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 96, pp. 11-22. DIO: 10.1016/j.ijepes.2017.09.028
23. Meenakshi Devi, M., Geethanjali, M., 2020. Hybrid of Genetic Algorithm and Minimum Spanning Tree method for optimal PMU placements. *Measurement*, 154, p. 107476. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107476
24. Zhang, Y., Gong, Y., Gu, T., Li, Y., Zhang, J., 2017. Flexible genetic algorithm: A simple and generic approach to node placement problems. *Applied Soft Computing*, 52, pp. 457-470. DOI: 10.1016/j.asoc.2016.10.022
25. Vuletic, J., Todorovski, M., 2016. Optimal capacitor placement in distorted distribution networks with different load models using Penalty Free Genetic Algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, pp. 174-182. DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.11.065
26. Singh, B., Mukherjee, V., Tiwari, P., 2016. Genetic algorithm optimized impact assessment of optimally placed DGs and FACTS controller with different load models from minimum total real power loss viewpoint. *Energy and Buildings*, 126, pp. 194-219, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.05.033
27. Vitayasak, S., Pongcharoen, P., Hicks, C., 2017. A tool for solving stochastic dynamic facility layout problems with stochastic demand using either a Genetic Algorithm or modified Backtracking Search Algorithm. *International Journal of Production Economics*, 190, pp. 146-157. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.03.019
28. Gong, X., Plets, D., Tanghe, E., De Pessemier, T., Martens, L., Joseph, W., 2018. An efficient genetic algorithm for large-scale planning of dense and robust industrial wireless networks. *Expert Systems with Applications*, 96, pp. 311-329. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.12.011
29. He, T., Wang, H., Yoon, S., 2018. Comparison of Four Population-Based Meta-Heuristic Algorithms on Pick-and-Place Optimization. *Procedia Manufacturing*, 17, pp. 944-951. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.112
30. Ganguly, S., Samajpati, D., 2017. Distributed generation allocation with on-load tap changer on radial distribution networks using adaptive genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, 59, pp. 45-67. DOI: 10.1016/j.asoc.2017.05.041.
31. Shkarupylo, V., Skrupsky, S., Oliinyk, A., Kolpakova, T., 2017. Development of stratified approach to software defined networks simulation. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*, 89, 5/9, pp. 67–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.110142
32. Oliinyk, A., Zaiko, T., Subbotin, S., 2014. Training sample reduction based on association rules for neuro-fuzzy networks synthesis. *Optical Memory and Neural Networks*, 23, 2, pp 89–95. DOI: 10.3103/S1060992X14020039
33. Oliinyk, A., Zayko, T., Subbotin, S., 2014. Synthesis of Neuro-Fuzzy Networks on the Basis of Association Rules. *Cybernetics and Systems Analysis*, 50, 3, pp. 348-357. DOI: 10.1007/s10559-014-9623-7

34. Oliinyk, A., Fedorchenko, I., Stepanenko, A., Rud, M., Goncharenko, D., 2019. Combinato-rial optimization problems solving based on evolutionary approach. IEEE: 2019 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), pp. 41-45. DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779290
35. Oliinyk A., Fedorchenko, I., Stepanenko, A., Rud, M., Goncharenko, D, 2018. A Evolutionary method for solving the traveling salesman problem. IEEE: Problems of Infocommunications. Science and Technology : 5th International Scientific-Practical Conference PICST2018, Kharkiv, Kharkiv National University of Radioelectronics, pp. 331–339. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632033
36. Stepanenko, A., Oliinyk, A., Deineha, L., Zaiko, T., 2018. Development of the method for decomposition of superpositions of unknown pulsed signals using the secondorder adaptive spectral analysis. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*, 2(9-92), pp. 48-54.
37. Fedorchenko, I., Oliinyk, A., Stepanenko, A., Zaiko, T., Shylo, S., Svyrydenko, A., 2019. Development of the modified methods to train a neural network to solve the task on recognition of road users. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 9/98, pp. 46–55. DOI: 10.15587 / 1729-4061.2019.164789
38. Fedorchenko, I., Oliinyk, A., Stepanenko, A., Zaiko, T., Korniienko, S., Burtsev, N., 2019. Development of a genetic algorithm for placing power supply sources in a distributed electric network. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies,* 5/3 (101), pp. 6–16. doi: 10.15587 / 1729-4061.2019.180897.
39. Fedorchenko, I., Oliinyk, A., Stepanenko, A., Zaiko, T., Korniienko, S., Kharchenko A., 2020. Construction of a genetic method to forecast the population health indicators based on neural network models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 4103, pp. 52-63. DOI: 10.15587 / 1729-4061.2020.197319

RESUME

I. Fedorchenko, A. Oliinyk, S. Korniienko, A. Kharchenko

Development and research of a genetic method for the analysis and determination of the location of power grid objects

The problem of combinatorial optimization is considered in relation to the choice of the location of the location of power supplies when solving the problem of the development of urban distribution networks of power supply. Two methods have been developed for placing power supplies and assigning consumers to them to solve this problem. The first developed method consists in placing power supplies of the same standard sizes, and the second – of different standard sizes.

The fundamental difference between the created methods and the existing ones is that the proposed methods take into account all the material of the problem and have specialized methods for coding possible solutions, modified operators of crossing and selection. The proposed methods effectively solve the problem of low inheritance, topological unfeasibility of the found solutions, as a result of which the execution time is significantly reduced and the accuracy of calculations is increased. In the developed methods, the lack of taking into account the restrictions on the placement of new power supplies is realized, which made it possible to solve the problem of applying the methods for a narrow range of problems.

A comparative analysis of the results obtained by placing power supplies of the same standard sizes and known methods was carried out, and it was found that the developed method works faster than the known methods.

It is shown that the proposed approach ensures stable convergence of the search process by an acceptable number of steps without artificial limitation of the search space and the use of additional expert information on the feasibility of possible solutions.

The results obtained allow us to propose effective methods to improve the quality of decisions made on the choice of the location of power supply facilities in the design of urban electrical.

Надійшла до редакції 10.01.2020